מבחן נגיפה - Impact test

<u>מבוא</u>

בבדיקת הנגיפה (The Impact Test) מודדים את האנרגיה הדרושה לשבירת החומר המחורץ במאמץ פתאומי. כמו כן, בבדיקת הנגיפה נקבעת עמידותם של חומרים בפני זעזועים וחבטות פתאומיות, ומכאן ניתן לקבוע גם את מידת פריכותן או משיכותן של חומרים.

כושר ספיגת אנרגיה הוא התכונה החשובה ביותר בתגובת מבנה לעומסים דינמיים .

חומר משיך- חומר הסופג אנרגיה רבה יותר = דפורמציה פלסטית רבה יותר עד לשבר.

חומר פריך – חומר אשר כמעט שלא סופג אנרגיה לשבר – כמעט שלא יראה דפורמציה פלסטית.

ניסוי נגיפה בודק, למעשה, סוג מסוים של משיכות/פריכות – מודד את ההתנגדות של חומרים מחורצים לדפורמציה פלסטית מהירה מאוד.

בדיקת נגיפה היא בדיקה דינמית, המקיפה את התכונות המכאניות של מתכות ונתכיהם. הסבה היא שהתנהגותן המכאנית של רוב המתכות העומדות בהעמסה דינמית שונה מהתנהגותן המכאניות בהעמסה סטטית (מתיחה, קשיות, זחילה). צורת המוצר העומד בהעמסה דינמית ונוכחותם של חריצים ואזורים של ריכוז מאמצים משפיעים גם על הפריכות.

שימו לב – תנאי נגיפה אינם בהכרח דומים לאלו שבניסוי מתיחה. משיכות הנמדדת מתוך עקומת מאמץ-עיבור (לפי דפורמציה לשבר או לפי השטח מתחת לעקומה) אינה בהכרח שווה לזו שנמדדת בניסוי נגיפה .

חסינות נגיפה (Impact Toughness) – יכולתו של חומר לספוג מהלומת נגיפה.
אנרגיית נגיפה (Impact Energy) – כמות האנרגיה הנספגת בחומר במהלך ניסוי נגיפה.

<u>מטרות ניסוי נגיפה.</u>

1.מציאת התנגדותן של מתכות לשבירתן תחת תנאי העמסה דינמית של הלם (נגיפה), תוך שימוש במכשיר נגיפה.

2. הכרת הגורמים העיקריים הקשורים בשבירתן של מתכות והמביאים לשינוי התנהגותם של חומרים מהתנהגות משיכה להתנהגות פריכה. גורמים אלו יהיו : טמפרטורה, קצב עיוות, מאמצים תלת צירים ועוד.

3.מציאת טמפרטורת המעבר הקריטית, אשר מתחתיה מתנהגים החומרים בצורה פריכה ומעליה בצורה משיכה, והשפעתם של גורמים מטלגרפיים על טמפרטורה זו.

4.השפעת הרכבו הכימי של החומר (בעיקר שינוי אחוזי הפחמן והזרחן להרכב הכימי של פלדות) על החוזק לנגיפה.

5.השפעת הטמפרטורות השונות (מעל ל- 20 °C ומתחת ל- 20 °C) על חוזק הנגיפה.

מבחן נגיפה - Impact test

תופעה	משיך	פריך
עקומת מאמץ-עיבור	חומר בעל פלסטיות ניכרת, התארכות רבה לפני שבר.	חומר בעל פלסטיות נמוכה, אין התארכות ניכרת לפני שבר.
ירידת שטח החתך $RA = \frac{A_0 - A_f}{A_0} \times 100$ A_0 שטח חתך התחלתי של הדגם. A_f שטח חתך באזור השבר.	Reduction in Area = RA RA מעל 50%.	RA קרוב לאפס.
מראה פני השבר.	שבר משיך – היווצרות צואר.	שבר פריך.
מנגנון השבר.	חד-גביש: **גזירה** – החלקת שתי שכבות אטומים זו על גבי זו. רב-גביש: מספר רב של נקעים נערם כנגד מכשול, לדוגמא גבול גרעין בעל מתח פנים גבוה (ראה איור 5.2), ואין מספיק אנרגיה לבקוע. המיקרו-סדק יגדל על-ידי "בליעת" נקעים, עד שמיקרו סדק יתקשר עם מיקרו-סדק שכן.	חד-גביש: **ביקוע** - הרחקת שתי שכבות אטומים מקבילות עד שכח הקוהזיה ביניהם יורד לאפס. רב-גגביש: מספר רב של נקעים נערם כנגד מכשול, לדוגמא גבול גרעין (ראה איור 5.2). המאמצים משתחררים על-ידי יצירת מיקרו-סדק עם מתח פנים נמוך. השבר יתפתח על מישור ביקוע העובר דרך המיקרו-סדק. זאת תהיה התחלתו של סדק פריך.

מבחן נגיפה - Impact test

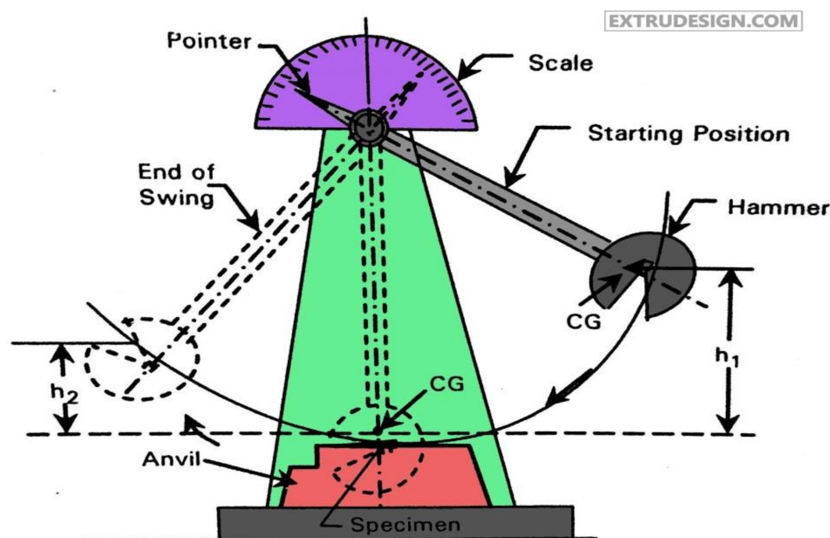


מכונה לביצוע ניסוי הנגיפה

עקרון בדיקת הנגיפה- כושר ההתנגדות של חומרים שונים לכוחות דינמיים, דהיינו שבירת דגם על-ידי מכונת הנגיפה שנקראת ״פטיש- מטוטלת״. כושר ההתנגדות של חומרים שונים לכוחות דינמיים שונה מאשר לכוחות סטטיים. ברוב המקרים התנגדות החומר יורדת בהעמסות דינמיות, ולכן חייבים להתחשב בכך.

עקרון פעולת בדיקת נגיפה

את ניסוי הנגיפה מבצעים בעזרת פטיש–מטוטלת ובעזרת אנרגיה פוטנציאלית. מהירות הנפילה המקסימלית של המטוטלת בעת המכה חייבת להימצא בגבולות 7-4 מטרים לשנייה. בבדיקה זו קובעים את התנגדות המתכת לזעזועים (הלם) ולחבטות פתאומיות, וכמו כן רגישותה לחריצים.



ניסוי נגיפה : פטיש הממוקם במטוטלת חובט בדגם המחורץ.

מכשיר הנגיפה מצויד במטוטלת כבדה הסובבת סביב ציר חסר חיכוך המצוי בחלקו העליון, ואילו בחלקו התחתון מצוי דגם תקני הנשען על סמכים מתאימים. כאשר המטוטלת מורמת תהיה האנרגיה הפוטנציאלית שלה (E_1) תלויה במסה שלה ובגובהה לפי הנוסחה $E_1 = mgh_1$. כאשר E_1 האנרגיה ההתחלתית של המטוטלת, m מסת המטוטלת, h_1 גובה מרכז הכובד של המטוטלת ביחס לדגם.

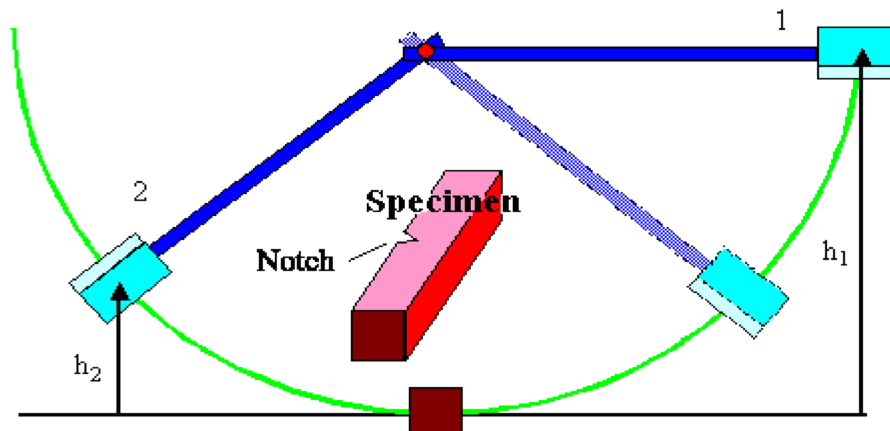
מבחן נגיפה - Impact test

עם שחרור המטוטלת ונפילתה החופשית היא צוברת אנרגיה קינטית, התלויה במסה שלה ובמהירותה V בהתאם לקשר $E_k = \frac{mv^2}{2}$. האנרגיה הקינטית תגיע לערכה המקסימלי בנקודה התחתונה ביותר שבה מגיעה האנרגיה הפוטנציאלית לאפס ביחס לדגם. בנקודה זו נתקלת המטוטלת בדגם החומר, שוברת אותו, מתרוממת שוב בהמשך דרכה עד לגובה מסוים – קטן יותר h_2 . במצב זה שוב צוברת המטוטלת אנרגיה פוטנציאלית, E_2, אשר תשווה למכפלת מסת המטוטלת בגובה הסופי $E_2 = mgh_2$.
ההפרש בין האנרגיה הפוטנציאלית ההתחלתית (E_1) לבין זו הסופית (E_2) מבטא את האנרגיה אשר הושקעה בשבירת החומר. אנרגיה זו תקרא אנרגית השבירה, E. ניתן לחשבה לפי הנוסחאות הבאות:

$$E = E_1 - E_2 = mgh_1 - mgh_2 = mg\ (h_1 - h_2)$$

טכניקה של בדיקת נגיפה

עקרון פעולת הבדיקה מבוסס על כוח הכובד (אנרגיה פוטנציאלית).



פעולת ביצוע בדיקת נגיפה

1.מטוטלת כבדה המתחילה בגובה h_1 חובטת בכוח גרביטציה בדגם מחורץ סטנדרטי הממוקם בגובה אפס.
2.לאחר שהדגם נשבר, המטוטלת ממשיכה עד לגובה h_2 שהינו קטן יותר כתוצאה משבירת הדגם.
3.האנרגיה הנספגת במהלך שבירת הדגם שווה להפרש האנרגיות של הפטיש. החישובים מתבצעים מתוך הפרשי האנרגיה:

$$E = E_1 - E_2 = mgh_1 - mgh_2 = mg\ (h_1 - h_2)$$

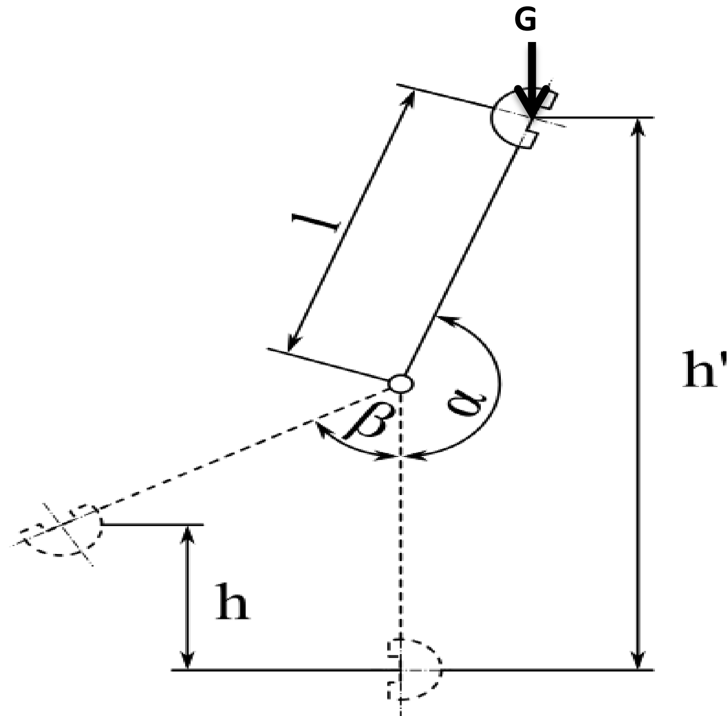
האנרגיה בתחילת התהליך שווה לאנרגיה הפוטנציאלית של הפטיש, לפיכך, האנרגיה הנספגת בחומר mgh_1.
את גובה פטיש-המטוטלת לפני הריסת הדגם ואחריה אפשר לקרוא על הסקאלה של המכשיר. לאחר בדיקת הנגיפה ניתן לקבל מסקנות עבור חומר הנבדק: משיך (פלסטי) או פריך.

ככל שהחומר יותר פריך הגובה הסופי של מטוטלת h_2 גבוה יותר ואנרגית הנגיפה נמוכה יותר,וככל שהחומר משיך (פלסטי) יותר הגובה הסופי של מטוטלת h_2 נמוך יותר ואנרגית הנגיפה גדולה יותר.

מבחן נגיפה- Impact test

אנרגיה לשבירת הדגמים

אנרגיה שבירת הדגמים שווה לאנגריה הנגיפה, הנספגת בחומר במהלך ניסוי הנגיפה.
האנרגיה לשבירת הדגם (עבודת הנגיפה) E היא האנרגיה הנדרשת לצורך שבירת הדגם בנגיפה דינמית. את שיעור האנרגיה הנגיפה מוצאים כהפרש בין האנרגיה הפוטנציאלית לפני שבירת הדגם $\boldsymbol{E_1}$ ואחריה $\boldsymbol{E_2}$.



תיאור גרפי לשבירת הדגמים

נתונים:

E – האנרגיה הנגיפה (קג״מ).
E_1 - האנרגיה הפוטנציאלית של מטוטלת לפני שבירת הדגם (קג״מ).
E_2- האנרגיה הפוטנציאלית של מטוטלת אחרי שבירת הדגם (קג״מ).
h'- גובה פטיש- המטוטלת ההתחלתי (לפני מבחן הנגיפה) - (מ׳, מ״מ).
h- גובה פטיש- המטוטלת הסופי (לאחר מבחן הנגיפה) - (מ׳, מ״מ).
L- אורך זרוע המטוטלת (מ׳, מ״מ).
G- משקל המטוטלת (ק״ג, N).
α- זווית של מצב המטוטלת לפני שבירת הדגם.
β- זווית של מצב המטוטלת אחרי שבירת הדגם.

$$E = E_1 - E_2 = G \cdot h' - G \cdot h_1 = G(h' - h_1) = G \cdot L(1 - \cos\alpha) - G \cdot L(1 - \cos\beta)$$

$$E = G \cdot L - G \cdot L \cdot \cos\alpha - GL + GL\cos\beta = GL\cos\beta - GL\cos\alpha = GL\,(\cos\beta - \cos\alpha)$$

מבחן נגיפה– Impact test

קביעת חוזק לנגיפה

את היחס בין אנרגיה המושקעת לצורך שבירת הדגם **(E)** לבין שטח חתך המינימלי של הדגם **(A)**, מכנים בשם ״חוזק לנגיפה״ (Impact strength) ומסומנים **KCV** או **KCU** או **KCT**

$$\mathbf{KCV= KCU} = \frac{E}{A_0}$$

כאשר : E- אנרגיה הדרושה לשבירת הדגם (קג״מ לסמ״ר)
A_0 - שטח החתך של הדגם.

<u>מסקנות</u>:

1. חומר פריך בעל חוזק הנגיפה הנמוך ביותר, והעמידות שלו בפני ההעמסה הדינמית קטנה ביותר. חומר משיך (פלסטי) בעל חוזק הנגיפה גדול ביותר, והעמידות שלו בפני ההעמסה הדינמית גדולה ביותר.

2. אפשר להשוות את רמת הפריכות של החומרים השונים אך ורק בתנאי, שניסוי הנגיפה בוצע לפי אותה השיטה (צ׳רפי או איזוד) ועל דגמים הזהים מהבחינה הגאומטרית.

3. בין חוזק הנגיפה לבין צורת השבר קיים קשר מוגדר

4. אפשר להעריך את תוצאות ניסוי הנגיפה לפי בדיקה חיצונית של השבר.

יחידות בניסוי הנגיפה

היחידות בניסוי הנגיפה הן יחידות של אנרגיה- ז׳אול (Joul)

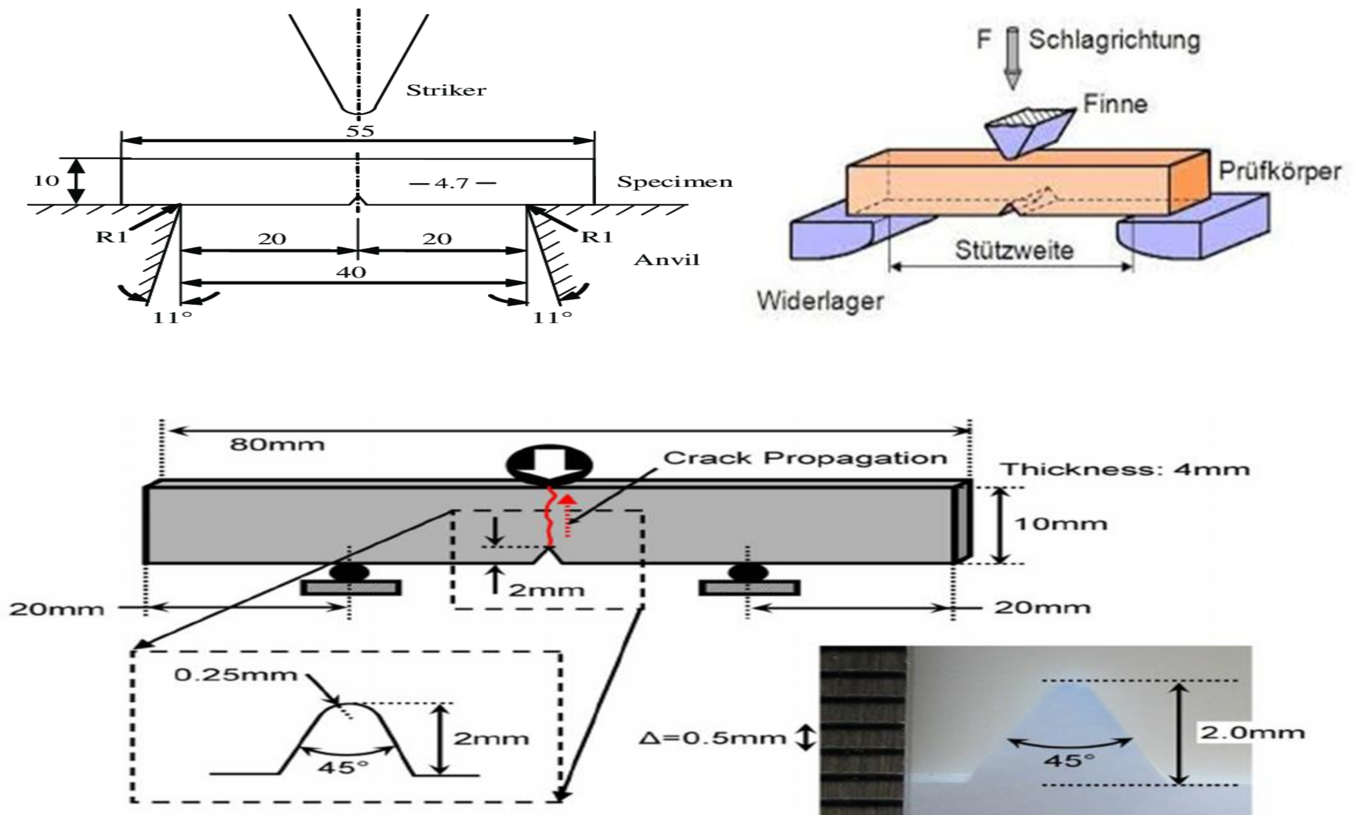
$$\mathbf{1J= 1\ N\cdot m=} \left(\frac{kg\cdot m}{s^2}\right)\cdot m = \frac{kg\cdot m^2}{s^2} = Pa\cdot m^3$$

מבחן נגיפה– Impact test

שיטות עיקריות של דגמי נגיפה

שני סוגים של דגמים בעלי חתך ריבועי וחריץ מרכזי מטיפוס ״V״.

דגם צ׳רפי (Charpy) – הדגם 55 × 10 × 10 מונח במאוזן בין שתי משענות. הפטיש חובט בדגם בצד המנוגד לחריץ. המרחק בין הסומכים של תופסן המכונה – 40 מ״מ.



שיטת הנגיפה צ׳רפי

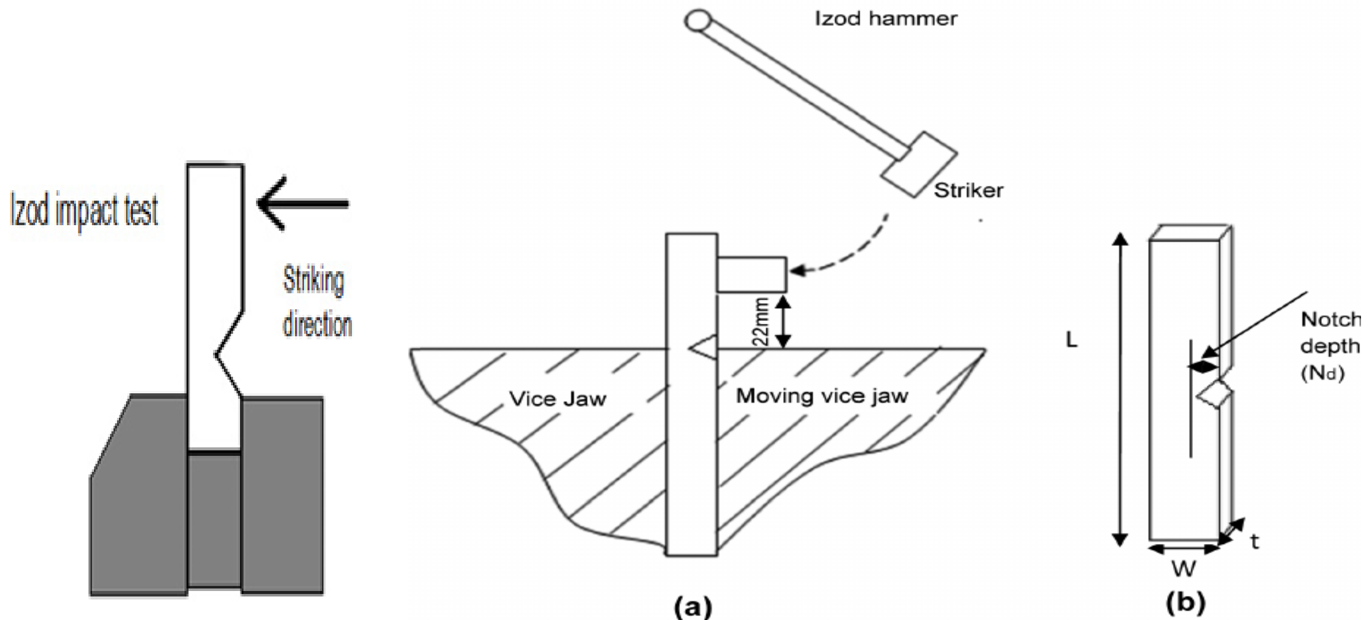
בדיקת נגיפה בשיטת צ׳ארפי (Charpy) פותחה על ידי ס.ב. ראסל וז׳ורז׳ צ׳ארפי בתחילת המאה ה - 20 והיא נשארה עד היום אחת השיטות הפופולריות ביותר לבדיקת נגיפה בשל הקלות היחסית של יצירת הדגמים וקבלת התוצאות. מנגנון הבדיקה מורכב ממטוטלת בעלת משקל ידוע, אשר נופלת מגובה מסוים ופוגעת בדגם הנבדק. ניתן להסיק את האנרגיה המועברת לחומר במהלך שבירת הדגם על ידי השוואת ההבדל בגובה המטוטלת לפני ואחרי השבר.

דגם הבדיקה בשיטת צ׳ארפי, הממוקם אופקית במכונה הוא, בדרך כלל, מוט מלבני בגודל 55 X 10X10 מ״מ עם חריץ באחת מהפאות הארוכות. החריץ הינו בצורת V או בצורת U' והוא ממוקם בצד הנגדי לצד פגיעת המטוטלת ומסייע לרכז את הלחץ ולעודד שבר. הבדיקה יכולה להתבצע הן בטמפרטורת החדר והן בטמפרטורות נמוכות.

בדיקת נגיפה בשיטת צ׳ארפי מבוצעת לרוב על מתכות, על פי תקנים ISO 148 , אך ישנם גם מספר סטנדרטים הקיימים עבור פלסטיק ופולימרים.

מבחן נגיפה– Impact test

דגם איזוד (Izod) - הדגם 75 × 10 × 10 מונח במאונך ומקובע בתוך מלחציים המורכבים משני לוחות עבים, לוח אחד נייח, לוח השני נייד. החריץ בולט במעט מבין הלוחות. הפטיש חובט בדגם בצד של חריץ. מרחק בין הלוח של תופסן עד מיקום המגע בדגם– 22 מ״מ



שיטת הנגיפה איזוד

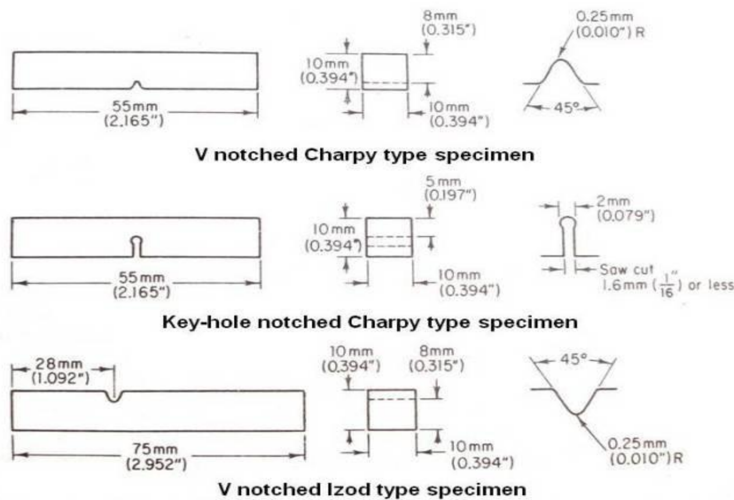
בדיקת נגיפה בשיטת איזוד (Izod) נקראת על שם המהנדס האנגלי אדווין גילברט איזוד, אשר תיאר לראשונה את שיטת הבדיקה בשנת 1903. מנגנון ודגמי הבדיקה דומים מאוד לשיטת צ׳ארפי, עם כמה הבדלים בולטים, כולל כיוון הדגם במכונה, שהינו אנכי עם חריץ מכוון לצד פגיעת המטוטלת, כאשר המטוטלת פוגעת בדגם בנקודה מדויקת מעל החריץ.

אחד ההבדלים העיקריים משיטת צ׳ארפי היא כי בדיקת נגיפה איזוד יכולה להתבצע על מתכות וכן על פולימרים. דגמי פלסטיק הם, בדרך כלל, מוטות מלבניים בגודל 64 × 3.2 × 12.7 מ״מ עם חריץ בצורת V.

ההבדלים בין שיטת נגיפה צ׳רפי לבין שיטת נגיפה איזוד

מס׳	אפיון	שיטת נגיפה צ׳רפי	שיטת נגיפה איזוד
1	צורה הנדסית של הדגם	ריבוע	ריבוע
2	מידות הדגם	10 × 10 ×55	10 × 10 ×75
3	צורת החריץ ומידותיו	״V״ (זווית 45 ° , רדיוס 0.25 מ״מ) או ״U״ (זווית 30 ° , רדיוס 2 מ״מ).	״V״ (זווית 45° , רדיוס 0.25 מ״מ)
4	הרתמת הדגם בתופסן מכונה ״פטיש-מטוטלת״	מונח במאוזן בין שתי משענות של מכונת הנגיפה	מונח במאונך ומקובע בתוך מלחציים בקצה אחד.
5	מיקום המגע בזמן הניסוי הנגיפה	במרכז הדגם, בצלע מקביל לחריץ.	בקצה חופשי של הדגם, מצד החריץ.
6	יחידות בניסוי הנגיפה	Joul (J) או kg· m	Joul (J) או kg· m

מבחן נגיפה– Impact test

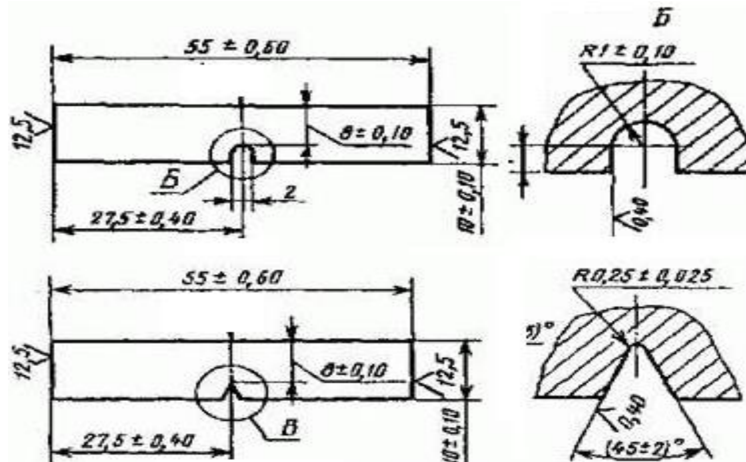




מכונות לביצוע בדיקות חוזק נגיפה

סוגי החריצים

קיימים סוגים שונים של חריצים הנעשים בדגמי החומרים לבדיקת נגיפה. שלושת סוגי החריצים המקובלים ביותר הם : חריץ ״V״ , חריץ ״U״ וחריץ ״ T״ (מנעול).



צורות חריצים

נוכחות החריץ נועדת ליצור ריכוז מאמצים תלת-צירים בשורש החריץ, כדי לסייע לשבירת הדגם ולהבטיח העמסה בצורה מהירה על-ידי פגיעת פטיש-מטוטלת. זו גם הסיבה, שבשיטה זו נמדדת רגישות החומר לחריץ. יש לציין, כי ערכה של האנרגיה לשבר תלויה בסוג החריץ הקיים בדגם (V, U, חור המנעול - T). תוצאות הניסוי תלויות ברדיוס החריץ, שכן **ככל שרדיוס החריץ קטן יותר, כך ריכוז המאמצים בחומר גבוה יותר, ועל-כן האנרגיה הדרושה לשבירת הדגם נמוכה יותר**. למבחן הנגיפה יש ערך השוואתי בלבד, ושימוש בצורות שונות של חריצים מניב להביא תוצאות שונות.

רגישות חריץ (Notch Sensitivity) – רגישות החומר לנוכחות חריץ בפני השטח. נוכחות חריץ מורידה את יכולתו של החומר לספוג אנרגיה ומאפשרת השוואה בין חומרים שונים.

מבחן נגיפה– Impact test

הצורות האופייניות של שיברי הדגמים



שבר בלתי אחיד (למעלה) ופשר פריך (למטה)



שבר פריך



שבר משיך

שבר משיך מתקבל לאחר דפורמציה פלסטית ניכרת.
שבר פריך אופייני לחומר פריך ללא סימנים של הדפורמציה הפלסטית .
שבר בלתי אחיד אופייני לחומר אנאיזוטרופי.

השפעת גורמים שונים על פריכות בחומרים

הגורמים העיקריים המשפיעים על מעבר החומר משבר משיך (עם ספיגת אנרגית נגיפה גבוהה) לשבר פריך (עם ספיגת אנרגית נגיפה נמוכה) הם :

1.טמפרטורה
2.יסודות כימיים (הרכב הכימי של החומר)
3.עומס תלת צירי
4.מהירות העמסה
5.פגמים במבנה מטלגרפי
6. גודל הגרעינים של מבנה מטלגרפי
7.כיוון הסיבים בחומרים מערגלים
8.צורות החריצים בדגמי הנגיפה.

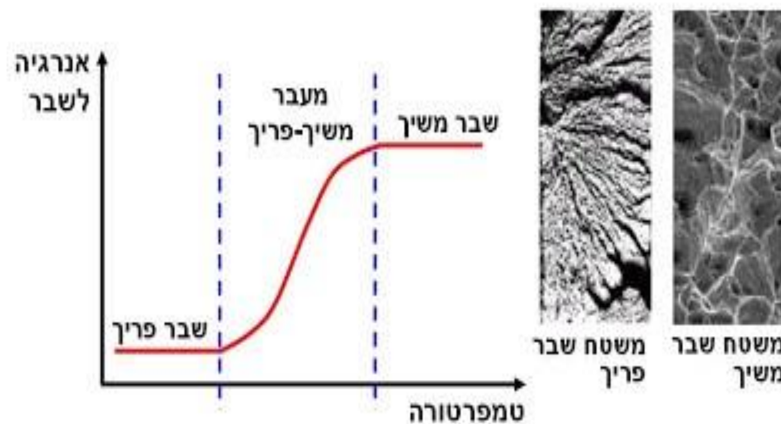
גורמים חיצוניים	גורמים פנימיים
טמפרטורה. עומס תלת צירי. מהירות העמסה. צורות החריצים בדגמי הנגיפה.	יסודות כימיים (הרכב הכימי של החומר). פגמים במבנה מטלגרפי. גודל הגרעינים של מבנה מטלגרפי. כיוון הסיבים בחומרים מערגלים.

מבחן נגיפה– Impact test

השפעת טמפרטורות שונות על חוזק נגיפה–אנרגית הנגיפה כתלות בטמפרטורה

בדיקת נגיפה של דגמי חומרים שונים בטמפרטורות שונות יביאו לקבלת ערכי אנרגית השבירה כתלות בטמפרטורות הבדיקה. נמצא כי עם ירידה הטמפרטורה יורדת אנרגית הנגיפה ומאמץ הכניעה עולה. בטווח צר של טמפרטורה נמצאה ירידה תלולה באנרגית הנגיפה שהחומר יכול לספוג לפני השבירה.

טמפרטורות מעבר משיך-פריך –(Ductile to Brittle Transition Temperature)- DBTT – הטמפרטורה שבה משתנה אופי השבר, משבר משיך לשבר פריך.
מקובל להציג את אנרגיית הנגיפה כתלות בטמפרטורה.



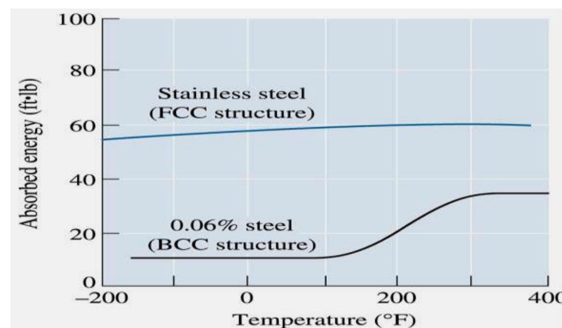
תיאור גרפי טמפרטורת מעבר

שבר פריך מתרחש ללא התראה מוקדמת.
מבחינה תכנונית-הנדסית, חובה לבדוק את טמפרטורת המעבר משיך-פריך ולהקפיד להימצא תמיד מעליה. חומרים עם טמפרטורת מעבר משיך-פריך נמוכה עדיפים על אלו בעלי טמפרטורות מעבר גבוהה.

מתכות BCC הינן, לרוב, בעלות טמפרטורות מעבר משיך-פריך. יש טמפרטורה שמעליה המתכת מתנהגת כחומר משיך, ואילו למטה ממנה- כחומר פריך.

מתכות FCC אינן מציגות מעבר משיך-פריך, זאת אומרת אנרגיית השבר משתנה באופן רציף יחסית (השתנות ליניארית), ולפיכך טובות לתפעול בטמפרטורות קריוגניות. בגלל סבילותם הדינמית של חומרים, כמו אלומיניום ונחושת- דרושה אנרגיה ניכרת כדי לגרום להם לשבר בלא תלות בטמפרטורה.

מתכות HCP פריכות מהאופי הקריסטליים שלהן ויציגו אנרגיה נמוכה לשבר בתחום רחב של טמפרטורות.

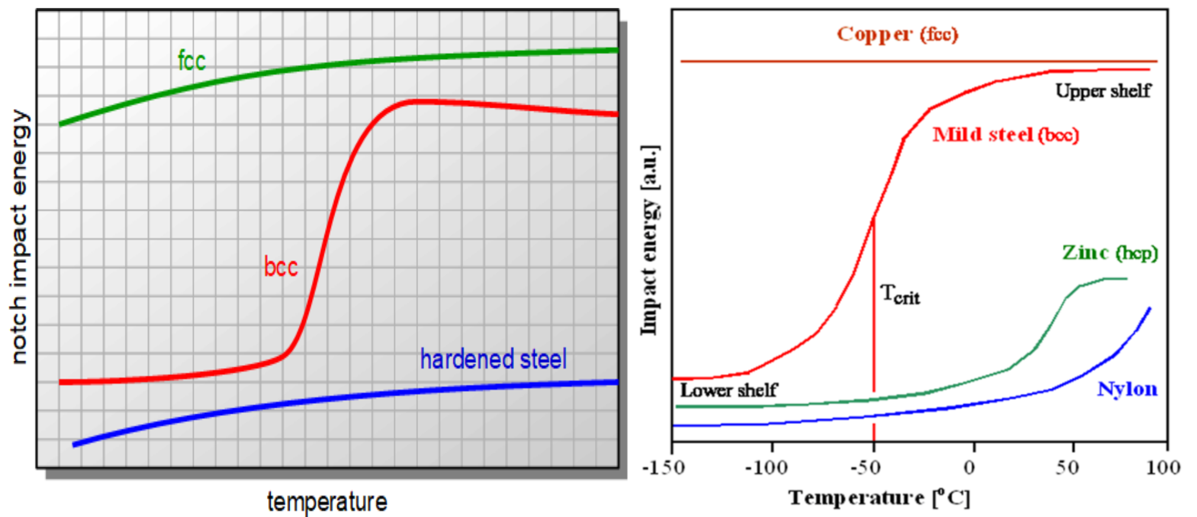


תיאור גרפי טמפרטורות מעבר המבנים שונים

תוצאות ניסוי נגיפה בשיטת צ'רפי, המציגה את האנרגיה כתלות בטמפרטורה עבור פלדות B.C.C ועבור פלדות F.C.C.

מבחן נגיפה– Impact test

אנרגיית הנגיפה כתלות בטמפרטורת במבנים שונים



השפעת יסודות כימיים שונים על חוזק לנגיפה

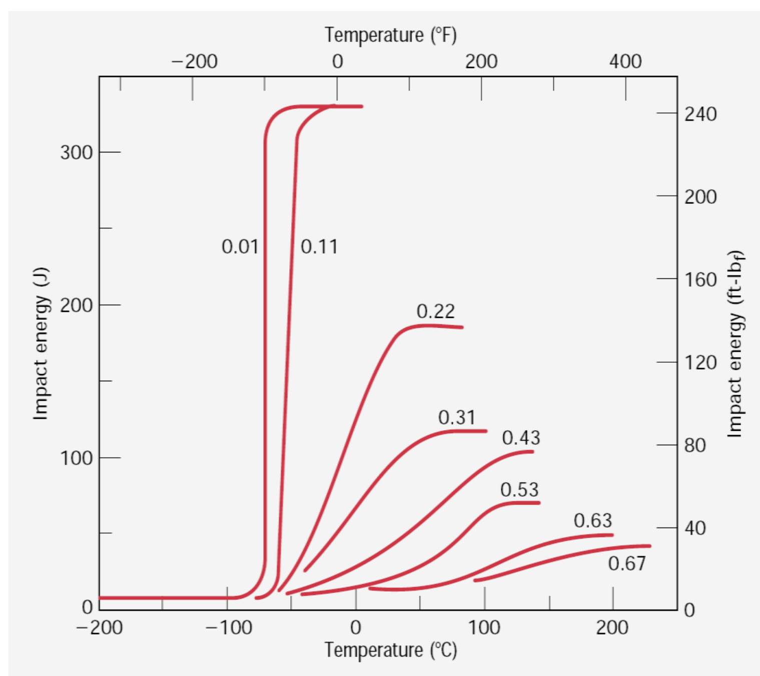
הגדלת אחוז הפחמן בפלדה משפר חוזק. אך יחד-עם-זאת:

-הגדלת תכולת הפחמן בפלדה מגדילה את טמפרטורת המעבר משיך-פריך ומהווה מוקד פריכות בפלדות.

-תופעת משיך-פריך במתכות ניתנת להבנה מתוך תופעת הדפורמציה הפלסטית ומתוך האנרגיה הדרושה לשבר גזירה / ביקוע.

-למתכות FCC מערכות החלקה רבות וצפופות, כך שתמיד תהיינה בזווית מועדפת למאמץ הגזירה המופרד ויתאפשרו החלקות צולבות.

-למתכות BCC אין מערכות החלקה צפופות, כך שבטמפרטורת נמוכה מספר המערכות המופעלות פוחת ואינו מאפשר החלקות צולבות. בטמפרטורת נמוכה, האנרגיה הדרושה להפרדה אטומית (ביקוע) נמוכה מזו הנדרשת לבצע החלקת נקעים (גזירה) ויועדף שבר פריך



השפעת אחוז הפחמן על חוזק נגיפה בפלדות פחמניות

מבחן נגיפה– Impact test

חומרים שמורידים חוזק לנגיפה במסגים שונים:

סגסוגת	יסודות
פלדות פחמניות	פחמן, זרחן
פלדות סגסוגות בינוניות	ניקל, כרום, מנגן
פלדות עשירות סגסוגות	זרחן, חנקן, ארסן, אנטימון

חומרים שמעלים חוזק לנגיפה : אלומיניום, נחושת.

<u>מסקנות</u> :

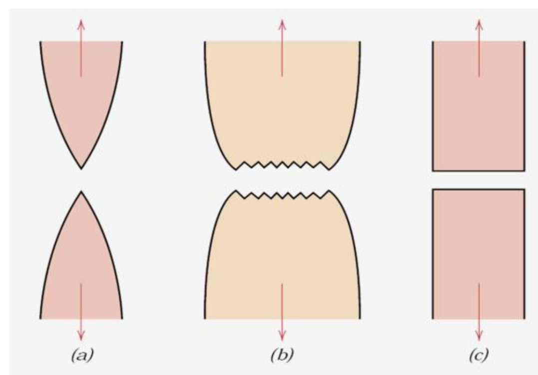
—שבר פריך (Brittle Fracture) – שבר המציג דפורמציה פלסטית מועטה בלבד, שכמעט אינה מלוּוָה בספיגת אנרגיה במהלך השבירה.

—שבר משיך – קל להבחנה ולמניעת כשל, היות ומציג הוא דפורמציה פלסטית והיווצרות צוואר בטרם שבירתו.

—שבר משיך (Ductile Fracture) – שבר המציג דפורמציה פלסטית משמעותית, עם ספיגת אנרגיה גבוהה עד לשבר.

—שבר פריך – קשה לזיהוי, היות ומתרחש ללא סימנים מוקדמים, ללא אזהרה מוקדמת. מתרחש במהירות באופן קטסטרופלי.

—חסינות לשבר – (Fracture Toughness) – יכולתו של החומר להתנגד להתקדמות סדקים.



שבר פריך אידיאלי (מימין), שבר משיך אידיאלי (משמאל) ושבר משיך של מתכות (במרכז)

השפעת עומס תלת-צירי על חוזק הנגיפה

הפעלת עומס תלת-צירי על חומר מביאה לקבלת מאמץ כניעה גדול יותר.
ניתן לומר, כי עומס תלת צירי גורם לעליית מאמץ הכניעה של החומר ללא שינוי במאמץ התאורטי, ולהקדמות סדק בחומר במעוותים נמוכים יותר, שפירושו ירידה בערכו של מקדם חסינות השבר K_{1c} .

השפעת טמפרטורות שונות על חוזק הנגיפה בפלדות לאחר טיפול תרמי מסוים

- **הרפיה נמוכה** (עד 200 °C) : עם עליית טמפרטורה חוזק נגיפה עולה.
- **הרפיה בינונית** (מ- 200 °C עד 380 °C) עם עליית טמפרטורה חוזק נגיפה יורד,
- **הרפיה בינונית** (מ- 380 °C עד 450 °C) עם עליית טמפרטורה חוזק נגיפה עולה.
- **הרפיה גבוהה** (מ- 4500 °C עד 650 °C) עם עליית טמפרטורה חוזק נגיפה עולה.
- **לאחר חיסום** : בטמפרטורות מעל (+ 10°C) – חומר משיך, חוזק נגיפה גבוה. חוזק לנגיפה יורד בין (+ 10°C) עד (- 30°C) דרסטי, כך שבטמפרטורה של (- 30 °C) חוזק נגיפה נמוך- חומר פריך.
- **לאחר הרפיה** : קיים מעבר בין חומר משיך לבין חומר פריך בין טמפרטורות (+ 10°C עד (- 10°C).
- **לאחר ריפוי** : שינוי טמפרטורות שליליות לחיוביות לא משפיע על חוזק הנגיפה

מבחן נגיפה– Impact test

השפעת מהירות העמסה על חוזק נגיפה

בדרך כלל בקצווי עיוות גבוהים, עם עליית קצב המעוות מאמץ הכניעה של החומר עולה. בהמסה מהירה אין הנקעים מספיקים לנוע על מישורי החלקה, כך שצפיפותם עולה, והחומר יתנהג בצורה פריכה יותר מאשר בהעמסה רגילה, וקיים קשר בין מאמץ הכניעה לבין קצב המעוות:

$$\sigma_y = \mathbf{A} + \boldsymbol{B}\boldsymbol{log}\,(\frac{\boldsymbol{dE}}{\boldsymbol{dt}})$$

כאשר: B, A– קבועים של חומר

dE/dt – קצב המעוות

השפעת פגומים במבנה מטלגרפי על חוזק נגיפה

במבחן הנגיפה יש לצפות כי חומר פגום, שיש בו בועות אוויר או מרכזים חלולים, עלול לעמוד בפני מבחן הנגיפה, לכן יש לבחון היטב את מקום השבר בטרם תוסק המסקנה על טיב החומר.

השפעת גודל הגרעינים במבנה מטלגרפי על חוזק נגיפה

התנגדותה לנגיפה של מתכת בעלת גרעינים גדולים קטנה יותר מהתנגדותה של מתכת בעלת גרעינים עדינים, שכן בגרעינים עדינים על הסדק לשנות את כיוונו ואורכו פעמים רבות יותר משעליו לשנות במבנה גס.

<u>מיקרו-מבנה של שבר משיך</u>:

-שבר תוך-גרעיני.

-דפורמציה גדולה לשבר, היווצרות צוואר ויצירת מבנה קונוס ו״ספל״.

<u>מיקרו-מבנה של שבר פריך</u>:

שבר פריך יכול להיות שבר תוך-גרעיני, או שבר בין-גרעיני המתרחש בגבולות גרעינים ומתקדם דרכם.

בכל אופן, פני השבר נראים מחוספסים ומישוריים.

השבר מתרחש ללא היווצרות צוואר, ללא אזהרה מוקדמת, ובמהירות קטסטרופלית.

שבר פריך יתרחש בחומר, רק אם אין אפשרות לדפורמציה פלסטית.

השפעת כיוון הסיבים בחומר מעורגל על חוזק נגיפה

דגם שבו סיבי הערגול הם לאורך הציר הראשי, זקוק לאנרגיה רבה יותר לשם היווצרות הסדק, מאשר דגם שבו הסיבים בניצבים לציר זה.

<u>סיכום</u>:

1.חוזק הנגיפה יורד בצורה דרסטית עם ירידת הטמפרטורה.

2.חוזק הנגיפה יורד כתוצאה ממאמצים תרמיים משתיירים.

3.הקשיית מעוותים מקטינה את חוזק הנגיפה.

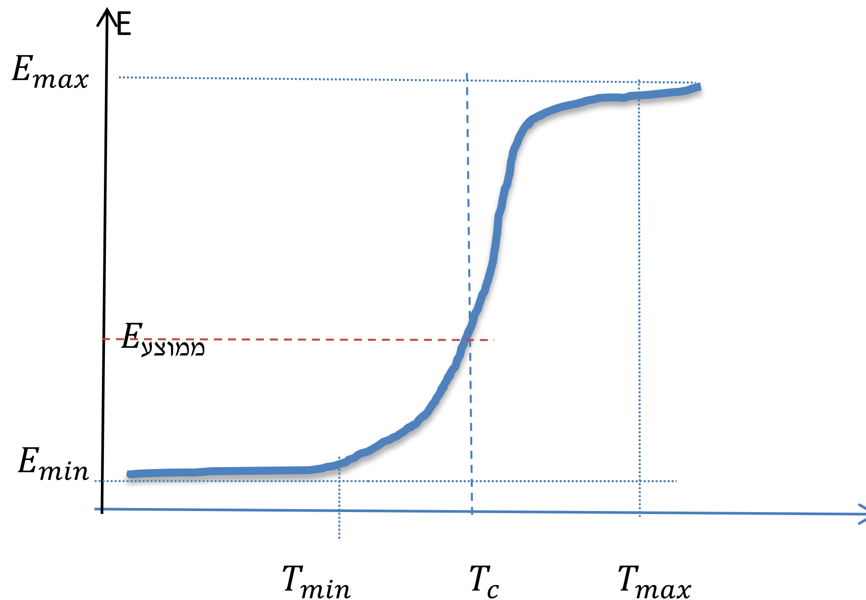
4.חוזק הנגיפה עולה, כאשר החומר הוא בעל מבנה גרעיני עדין.

5.השפעה גדולה על חוזק הנגיפה יש להרכב הכימי. לדוגמה: חוזק יורד ככל שאחוז הפחמן עולה. כמות זרחן גדולה בטמפרטורות נמוכות מקטינה את חוזק הנגיפה.

6.ככל שחומר משיך יותר, אנרגית הנגיפה גבוהה יותר, למרות שככל שחומר פריך יותר אנרגית הנגיפה נמוכה יותר.

מציאת טמפרטורת המעבר הקריטית





תיאור גרפי של אנרגית השבירה כתלות בטמפרטורת הבדיקות

מציאותה של טמפרטורת המעבר T_c מתוך איור יכולה להיעשות בשלוש שיטות:

א. לפי הטמפרטורה המינימלית והמקסימלית:

$$T_c = \frac{T_{max}+T_{min}}{2}$$

ב. לפי האנרגיה המינימלית והמקסימלית ו הטמפרטורה המינימלית והמקסימלית:

$$T_c = T(E_{ממוצע}) = T\left(\frac{E_{max}+E_{min}}{2}\right)$$

ג. על-פי צורת השבר, טמפרטורת המעבר נקבעת כאשר השבר המתקבל הינו 50 % פריך ו- 50 % משיך.

השיטה השנייה היא המדויקת מבין שלוש השיטות לקביעת טמפרטורת המעבר, T_c .

המטרה העיקרית של בדיקת נגיפה היא לאפשר בחירת חומרים חסינים (בנוכחות חריץ) בטמפרטורות נמוכות, כלומר מציאת חומרים בעלי חסינות גבוהה לשבר.

מבחן נגיפה– Impact test

חסינות השבר

מכניקת השבר היא תחום החוקר היכן צפויים להיווצר סדקים, באילו נסיבות ימשיכו סדקים אלו לגדול עד לשבר, וכיצד אפשר לעצור את התקדמות הסדקים בחומר. כולנו נתקלים בהתקדמות סדקים בחיי היום-יום: כוס שנשברה, קיר שנסדק בבית, סדקים באדמה שהתייבשה, שמשת מכונית שנסדקה בתאונה. מבנים רבים, הן כאלה העשויים מחומר פריך כבטון והן כאלה העשויים מחומר משיך כפלדה, עלולים להיכשל בתנאים מסוימים. חשוב להבין את מאפייניהם של סדקים, מכיוון שהם יכולים לגרום לכשל מבני.

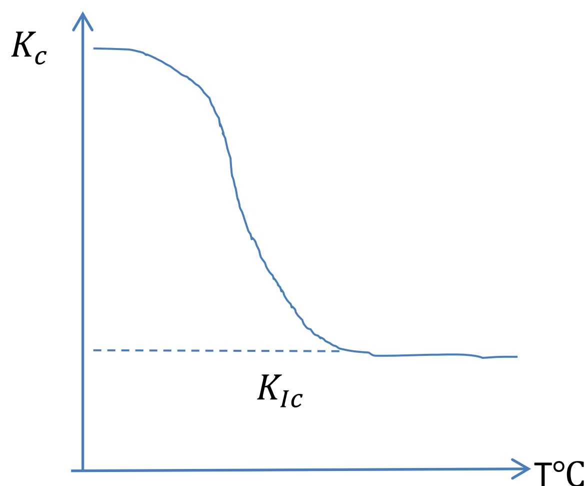
במכניקת השבר נעזרים בכלים מתמטיים, בשיטות ניסוי ובסימולציות מחשב, על מנת לחזות את התקדמותם של סדקים. באמצעות חישוב המאמצים (כוחות ליחידת שטח) והתזוזות בקרבת הסדק, אפשר לצפות כיצד יתקדם סדק במבנה שפועלים עליו מאמצים, ולקבוע מהם התנאים שבהם יתרחש כישלון במבנה.

אפשר להעריך (באופן איכותי ולא כמותי) את מידת החסינות לשבר של החומר לשבר על פי גודל השטח שמתחת לעקומת המאמץ-עיבור. השטח שמתחת לגרף מציין את כמות האנרגיה הנבלעת בחומר עד לשבירתו. ככל שהשטח שמתחת לגרף גדול יותר (האנרגיה הדרושה לשבר גבוהה יותר), הרי שהחומר משיך יותר, או בעל התנגדות גבוהה יותר לשבר.

לחומרים קרמים מודול יאנג גבוה, כלומר הם קשיחים, אך הם חומרים פריכים, הנשברים בסוף התחום האלסטי ללא כל תחום פלסטי (כלומר ללא אזהרה מוקדמת). נקודת הכניעה של חומרים קרמים היא גם נקודת השבירה שלהם – כלומר אין אזהרה מוקדמת שהחומר עומד להישבר. השטח שמתחת לעקומת המאמץ-מעוות קטן בהשוואה לחומרים מתכתיים, מה שאומר שלחומר ישנה מעט אנרגיה אגורה לשבר.

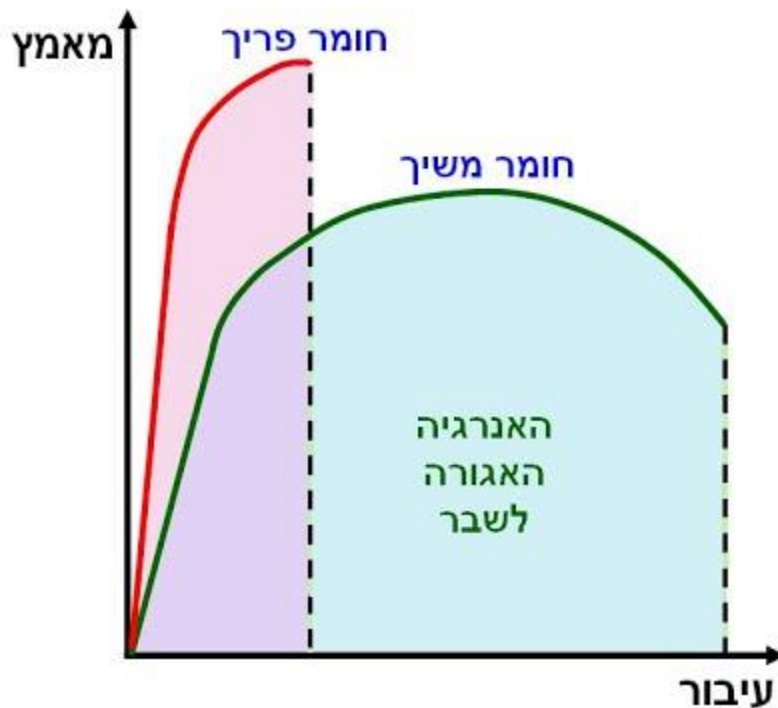
פולימרים עשויים ממולקולות-ענק שצורתן דמוית-שרשראות, הללו מפותלות במרחב וגם סביב צירן. בזמן ביצוע דפורמציה נמתחות שרשראות הפולימר, ומסתדרות באופן מקביל זו לזו. כתוצאה מכך נוצרים דיפולים (קוטביות) בין שרשראות סמוכות וקשרים הבין מולקולריים (קשרי ון-דר-וול ס וקשרי מימן) גורמים לחיזוק החומר. לדוגמה, סיבים העשויים מפולימר הפוליאתילן חזקים בערך פי חמשה לאחר ביצוע משיכה בקור (דפורמציה פלסטית), זאת בזכות שינוי הסידור המרחבי של מולקולות הפולימר בעקבות המשיכה.

חסינות השבר K_c של פלדה, ערכו יורד עם עליית העובי, ומגיעה לסף בתנאי שבר של מעוות מישורי, ערך זה הוא חסינות השבר הקריטי K_{Ic}.



מבחן נגיפה– Impact test

חסינות החומר, האנרגיה האצורה בחומר, יחסית לשטח מתחת לעקומת מאמץ מעוות.



דיאגרמת מאמץ- מעוות

ככל שאנרגית נגיפה גבוהה יותר, חסינות השבר (Toughness Fracture) של החומר גבוהה יותר, זאת אומרת, שהתנגדות החומר להתפשטות סדק תהיה גבוהה יותר.

חסינות שבר ותכנון

ערך מדוד במדויק של חסינות שבר (K_{Ic}), עבור חומר מסוים, **אינו תלוי לא באורך הסדק, לא בגיאומטריה, או במערכת העומס. זו היא תכונה של חומר בדיוק כמו שמאמץ הכניעה היא תכונה של חומר.**

מספר ערכים לדוגמא ניתנים בטבלה המצורפת:
בבחירת חומרים ערך חסינות השבר הוא קבוע. אם בוחרים חומר עם סדק יחסית גדול ויציב אזי המאמץ המתוכנן הוא קבוע וחייב להיות קטן מהערך של K_{Ic}.

$$K = f \cdot \sigma \sqrt{\pi a}$$

כאשר f הינו גורם גיאומטרי התלוי בדגם ובגיאומטריית הסדק.

מבחן נגיפה– Impact test

שאלות לדוגמה:

1.בדיקת הנגיפה מלמדת על מידת פריכותם או משייכותם של חומרים. מהו הנתון הנמדד בבדיקת נגיפה? ציין את היחידות של נתון זה? (קיץ 2009)
2.הגדר מהן שתי השיטות לקיבוע דגם בבדיקת נגיפה והצג את שיטות קיבוע הדגם בסרטוט. (קיץ 2009)
3.מהו ההבדל בהתנהגות חומרים בעלי מבנה BCC ומבנה FCC במבחן נגיפה הנערך כתלות בטמפרטורה? הסבר תשובתך והצג גרפים מתאימים לתופעה.(קיץ 2009)
4.מהן מטרות הניסוי חוזק לנגיפה?
5.מהן המסקנות העיקריות של הניסוי חוזק לנגיפה?
6.מהו ההבדל בין שני סוגי שברים, פריך ומשיך?
7.תאר אפיוני חומר כפריך/ משיך.
8.מהן השפעות נוספות על הקשיחות חומרים
9.מהם גורמי מעבר מחומר משיך לחומר פריך.
10.תאר מערכת הניסוי הנגיפה.
11.חשב אנרגיית שבירת הדגם בניסוי הנגיפה.
12.הסבר את מושגים הבאים: שבר, משיכות, פריכות.
13.מהו הקשר בין מתח הפנים של המתכת לבין תכונות המשיכות שלה?
14.צייר דיאגרמת מאמץ- מעוות אשר בה מופיע שבר פריך ודיאגרמת מאמץ-מעוות אשר בה מופיע שבר משיך.
15.לאחר ניסוי מתיחה נוצר שבר הנטוי בזווית של 45° מעלות. האם השבר פריך או משיך?
16.הצע ניסוי למדידת משיכות החומר על ידי מדידת ההתארכות.
17.הסבר את השפעת הטמפרטורה על משיכות החומר עבור חומר במבנה BCC ועבור חומר במבנה FCC, צרף גרפים.
18.הגדר והסבר מהי סבילות החומר.
19.הסבר מהי פריכות החריץ.
20.הסבר מהי פריכות נגיפה
21.למה נועד ניסוי הנגיפה?
22.מדוע נדרש לקחת לבדיקה דגמי נגיפה בכיוונים שונים (בכיוון הערגול ובניצב לו). (אביב – א' 2019)
23.נתון שהאנרגיה לנגיפה של כל דגמי הנגיפה, בכיוון הערגול (J 45) ובניצב לו (J 28) , עומדת בדרישה ההנדסית המינימלית (25J) הנדרשת לאנרגיית נגיפה. האם אפשר לאשר את הלוח לשימוש הנדסי **רק על סמך בדיקות הנגיפה?** (אביב-א' 2019)
24.מה מודדים בבדיקת נגיפה? (אביב-א' 2018)
25.מהן היחידות של תוצאות של בדיקת נגיפה? הצג דוגמה **אחת** ליחידות אלו. (אביב-א' 2018).
26.כיצד מתבטאת ההשפעה של המיקרו-מבנה (**גודל** גרעינים **וכיווניות** גרעינים) על עמידות נתך מתכתי בפני נגיפה? התייחס בתשובתך לשני הסעיפים המוצגים להלן:
1. עמידות בפני נגיפה – "טובה יותר" או "טובה פחות" בהקשר **לגודל** גרעינים: גרעינים קטנים או גרעינים גדולים.
2. עמידות בפני נגיפה - "טובה יותר" או "טובה פחות" בהקשר **לכיווניות** גרעינים: לאורך כיוון הערגול או בניצב לכיוון הערגול. (אביב-א' 2018).
27. מהו הצורך בקיומו של רדיוס בגודל של 0.025 מ"מ בתחתית החריץ בדגם סטנדרטי המשמש לביצוע בדיקת נגיפה? (אביב-א' 2018).
28. בבדיקת נגיפה על דגם צ'רפי (Charpy) העשוי מפלדה SAE 4340, לאחר חיסום בלבד, התקבלה תוצאה של 6 ג'אול. לאחר מכן בוצעה הרפיה לפלדה. איזה מבנה מטלוגרפי התקבל לאחר החיסום, ואיזה מבנה יהיה לאחר ההרפיה? האם ערך הנגיפה לאחר ההרפיה יהיה גבוה יותר או נמוך יותר? נמק את תשובתך.(קיץ 2016).
29.מה בודקים במתכות בתנאי העמסה דינמית? הבא דוגמה לבדיקה בתנאי העמסה דינמית, וציין מהם הפרמטרים הנבדקים בבדיקה זו. (אביב 2016).
30.ציין **שני** גורמים חיצוניים ראשיים הגורמים לפריכות חומרים. (אביב 2016).

מבחן נגיפה– Impact test

שאלות לדוגמה- המשך:

31.שרטט גרף, והצג בו את שינוי ההתנהגות של מתכות (ממשיך לפריך או מפריך למשיך) כפונקציה של טמפרטורה. האם התנהגות זו באה לידי ביטוי בכל הסגסוגות? הסבר את תשובתך. (אביב 2016).

32.שלושה דגמי נגיפה מאותה פלדה נבדקו בניסוי נגיפה בשלוש הטמפרטורות השונות (25°C, ‎196 °C - , 400 °C). שרטט במחברתך עקומת נגיפה סכמתית (אנרגיית נגיפה כנגד טמפרטורה) לפלדה הנבדקת. סמן על עקומת הנגיפה הסכמתית מהו המיקום המשוער של כל אחד משלושת הדגמים הנבדקים. הסבר את תשובתך. (קיץ 2015).

33.תאר בעזרת תרשים איכותי, מהלך של בדיקת נגיפה, והסבר מהי המשמעות של התוצאות של בדיקת הנגיפה. (אביב 2015)

34.בבדיקת הנגיפה בה נבדק דגם פלדה, המטוטלת הופלה ועצרה בנקודה התחתונה (דגם לא נשבר!). המחוג הראה (Joul) 240. הסבר מהי משמעות התוצאה שהתקבלה בעזרת משוואה מתאימה. (אביב 2015)

35.מהי מטרתו של הרדיוס שבבסיס החריץ בדגם נגיפה בעל חריץ בצורת " V". (אביב 2015)

36.תאר בקצרה את מהלך בדיקת הנגיפה, והסבר מהו העיקרון הפיזיקלי שעליו מבוססת בדיקה זו. (אביב 2015)

37.כיצד משפיע הטמפרטורה (מטמפרטורות נמוכות מאוד ועד טמפרטורות גבוהות) על הבדיקה של דגמי נגיפה מנתכי נחושת ופלדה? הסבר את תשובתך בעזרת גרף סכמתי (אנרגיה כנגד טמפרטורה) עבור הנחושת בעלת מבנה FCC ועבור הפלדה בעלת מבנה BCC. (אביב 2015)

38.מדוע מבחן הנגיפה נמנה עם קבוצת הבדיקות של ההעמסה הדינמית? (אביב 2015)

39.תאר כיצד מוצעת בדיקת הנגיפה הבודקת חוזק מתכת בהעמסה דינמית ורגישות לחריץ. שרטט איור סכמתי לתיאור הדביקה על סמך הקשר (נוסחה) ($E = G(H_1 - H_2)$. יש לציין מה מתארת כל אות בקשר זה. (קיץ 2013).

40.בבדיקת נגיפה לשני חומרים בעלי הרכב כימי זהה, שעברו טיפולים תרמיים שונים, התקבל לאחר שבר פריך ולאחר שבר משיך. איזו אנרגיית נגיפה (גבוהה או נמוכה) שייכת לכל סוג שבר? נמק את תשובתך באמצעות הקשר (נוסחה) ($E = G(H_1 - H_2)$. (קיץ 2013).

41.בדיקת נגיפה בוצעה לשני דגמי נגיפה עם חריץ V(דגם א' ודגם ב') שני הדגמים שנלקחו מפלטה בשני כיוונים מנוגדים (שתי וערב = האחד לאורך ציר X והשני לאורך ציר Y). התקבלו התוצאות הבאות:

דגם	קשיות (HB)	חוזק לנגיפה (Joul)
דגם א'	240	68
דגם ב'	243	19

הצג הסבר לתוצאות שהתקבלו. (קיץ 2013).

42.הגדר מהי "אנרגיית נגיפה". (אביב 2013)

43.הסבר את ההבדל בהתנהגות של חומרים בעלי מבנה BCC ומבנה FCC במבחן נגיפה הנערך כתלות בטמפרטורה. הצג את ההבדל בהתנהגות חומרים אלו באמצעות גרף מתאים. (אביב 2013)

44.הגדר "שבר פריך" ו"שבר משיך" . שלב בתשובתך את המונחים "אנרגיית נגיפה" ו"שטח שמתחת לעקומת מאמץ- מעוות " . (אביב 2013)

45.הסבר את שיטת "צ'ארפי " והצג שרטוט סכמתי לדגם לבדיקה זו. מדוע יש חשיבות ל- 0.025 בביצוע החריץ? הסבר תשובתך. (אביב 2013)

46.מה צפויה להיות אנרגיית הנגיפה של כל אחד משלושת דגמי הנגיפה, כלומר, שני דגמים מההיקף ודגם אחד מהמרכז. ציין את אנרגיית הנגיפה בסקלה יחסית, כלומר, אנרגיה "גבוהה" או אנרגיה "נמוכה". נמק תשובתך. (אביב 2011)

47.ציין ותאר שלושה גורמים חיצוניים, אשר גורמים לפריכות חומרים. (קיץ 2010)

48.שרטט גרף של אנרגיית הנגיפה כנגד טמפרטורת עבור מתכת במבנה BCC. סמן על הגרף את "טמפרטורת המעבר" והצג הסבר מפורט לתופעה. (קיץ 2010)

שאלות לדוגמה- המשך:

49.רשום האנרגיה הדרושה לשבירת דגם נגיפה. הסבר את הנוסחה ושרטט את הגרף המתאר את האנרגיה הדרושה כדי לשבור חומרים בעלי מבנה FCC וחומרים בעלי מבנה BCC כפונקציה של טמפרטורה. (קיץ 2007)

50.רשום והסבר בקצרה שלושה גורמים חיצוניים המשפיעים על פריכות חומרים. (קיץ 2007)

51.הצג שתי שיטות לקביעת טמפרטורת המעבר בניסוי נגיפה. (קיץ 2007)

52.במעבדת חומרים התקבל דו"ח בדיקות חוזק נגיפה שבוצעו לשלושה גדמים מאותה פלדה. להלן תוצאות אנרגיית השבירה (J) : 13 ג'אול, 24 ג'אול, 60 ג'אול.
ידוע שמכשיר הנגיפה ואופן המדידה היו תקינים. מה עשויה הסיבה לפיזור בתוצאות אנרגית השבירה ונהו סוג השבר שהתקבל עבור כל דגם? (אביב 2007).

53.רשום את נוסחת אנרגית השבירה עבור בדיקת נגיפה. במה תלויה אנרגית השבירה? (אביב 2007).

54.הצג, על גבי אותו גרף, את התנהגות אנרגיית הנגיפה כתלות בטמפרטורה, עבור מתכות בעלות מבנה BCC ועבור מתכות בעלות FCC . הסבר תשובתך.

55.הגדר מהי "בדיקת נגיפה" ומהם שני סוגי הדגמים המקובלים לביצוע בדיקה זו.(קיץ 2005)

56.נבדקו שני דגמים מפלדה. פלדה אחת בקשיות HRc 22 ופלדה שנייה בקשיות HRc 58. לאיזה פלדה תתקבל אנרגית נגיפה גבוהה ולאיזה נמוכה. נמק תשובתך. (קיץ 2005)

57.שרטט עקומת נגיפה (אנרגית השבר כתלות בטמפרטורה) בעלת מעבר משיך-פריך. (קיץ 2005)

58.בבדיקת נגיפה של חומר פריך עולה פטיש המטוטלת לגובה גדול יותר מאשר בבדיקת נגיפה של חומר משיך. אנרגיית הנגיפה נתונה: $E = G(h_0 - h_1)$ כאשר:

E – אנרגיית הנגיפה

G- משקל פטיש המטוטלת

h_0 – גובה הפטיש לפני הבדיקה

h_1 - גובה הפטיש המתרומם אחר הבדיקה

על סמך נתונים אלה, איזה חומר משיך או פריך נבחר כחומר המשמש כפגוש של רכב שמתוכנן לספוג אנרגיה במהלך ההתנגשות. נמק בפירוט. (אביב 2005)

59.בבדיקת תוצאות הנגיפה לאחר שבירת שני דגמים נראה שבשבירה אחד הדגמים פטיש המטוטלת נע לגובה h_0, ובשבירת הדגם השני הפטיש נע רק לגובה h_1 (נמוך יותר). מה ניתן לקבוע לגבי חומר הדגמים? (אביב 2004)

60. בנוסחה $E = G(h_0 - h_1)$

E-אנרגיית נגיפה

G-משקל פטיש המטוטלת

h_0 – גובה הפטיש לפני הבדיקה

h_1 – גובה שאליו מתרומם פטיש המטוטלת לאחר בדיקה

בטא את ה-E כפונקציה של אורך פטיש המטוטלת, והזוויות שבין הפטיש לאנך (זוויות). (אביב 2004).

61.מהי המטרה לביצוע "חריץ " בדגם הנגיפה? (אביב 2004)

62.מהו המידע המתקבל מבדיקת נגיפה ומהן היחידות של תוצאת בדיקת נגיפה? (קיץ 2017 מועד א').

63.שרטט גרף סכמתי המתקבל מניסוי נגיפה למתכת בעלת מבנה BCC, וציין על גבי הגרף את טמפרטורת המעבר, את הטמפרטורה בה החומר מתנהג כחומר פריך ואת הטמפרטורה בה החומר מתנהג כחומר משיך. (קיץ 2017 מועד א').

64.בוצע מחקר לבדיקת השפעת טמפרטורת ההרפיה של פלדה SAE 1040 על הקשיות ועל חוזק הנגיפה.
כל הדגמים עברו חיסום והרפיה: חימום לטמפרטורה של 850 °C למשך 40 דקות, קירור 200-680 °C למים וטיפול תרמי של הרפיה בטמפרטורות שונות. קשיות הדגמים לאחר החיסום היה HRc 57.
בטבלה לשאלה 2 מוצגות תוצאות הבדיקות:

שאלות לדוגמה- המשך:

המשך מסי 64 :

דגם	טמפרטורת הרפיה °C	קשיות HRc	אנרגיית נגיפה Joul
.1	200	47	10
.2	400	35	25
.3	500	30	40
.4	600	22	55
.5	680	<22	80

א. שרטט, על- סמך נתוני הטבלה, שתי עקומות בגרף אחד- בציר האופקי של הגרף טמפרטורה ובצירים האנכיים : בצד שמאל ערכי הקשיות ובצד ימין ערכי אנרגיית הנגיפה.
הנגיפה כנגד טמפרטורת ההרפיה.

ב. הסבר מהי המשמעות ההנדסית של התוצאות שהתקבלו במחקר :

ב-1. עבור חלק מכונה האמור לעבוד בטמפרטורת עבודה של 200 °C .

ב-2. עבור חלק מכונה האמור לעבוד בטמפרטורת עבודה של 600 °C .

ג. האם יש משמעות הנדסית לנקודת המפגש של שתי העקומות (עקומת ערכי הקשיות ועקומת ערכי אנרגיית הנגיפה)? נמק את תשובתך.